

УДК 627.027.12:536

О МАССОПЕРЕНОСЕ В КАПИЛЛЯРАХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОМЫВКАХ

М. И. ДАВИДЗОН

(Ивановский государственный университет)

Экспериментальное изучение процессов массопереноса внутри капилляров при жидкостных обработках текстильных материалов затруднено из-за малости размеров. В теоретических исследованиях чаще всего рассматривают диффузию в волокнистом субстрате. Между тем доставка массы вещества из объема к поверхности (или в обратном направлении) осуществляется по жидкости, заполняющей капилляры волокнистого материала.

В основе математической модели [1...3] по удалению вещества из капилляров лежит локальный закон сохранения массы переносимого вещества и уравнение кинетики. Ввиду того, что при таком подходе используются фундаментальные законы, можно ожидать и, как это оказалось в действительности [4], [5], математическое описание массопереноса справедливо и для процессов массопереноса, не связанных с текстильными технологиями.

Из [1...3] следует, что рассчитать процесс промывки можно, если известен коэффициент скорости процесса массопереноса γ (1/с), входящий в уравнение кинетики. Однако информация о численных значениях коэффициента γ и явлениях на него влияющих весьма ограничена.

В настоящем исследовании предпринята попытка аналитически показать, что в основе удаления вещества при промывках лежат диффузионные процессы с соответствующими возможностями влияния на коэффициент γ .

Пусть в капилляре радиуса r (м) находится водный раствор. С поверхности капилляра удаляются частицы (незакрепившегося красителя, щелочи, загрязнений и т. п.). Доставка частиц с поверхности может осуществляться диффузионным путем, вязкостным (вместе с переносом импульса), естественной и вынужденной конвекцией.

В изотермических условиях роль естественной конвекции по доставке частиц с поверхности капилляра не существенна. Процесс промывки протекает относительно медленно. Вследствие этого из механизмов удаления частиц, кроме диффузионного, следует учитывать, очевидно, тот, который обеспечивает наиболее медленную доставку частиц. Им является вязкостный – перенос массы вместе с импульсом.

При диффузионном механизме переноса удельный поток массы (вектор Умова) направлен с поверхности обратно направлению радиуса r к центру капилляра. Масса вещества, удаляемого за одну секунду с одного m^2 внутренней поверхности капилляра I_m , равна

$$I_m = D \frac{\partial c}{\partial r}, \quad (1)$$

где c – концентрация удаляемого вещества в объеме капилляра, $кг/м^3$; D – коэффициент диффузии, $м^2/с$; r – расстояние от оси капилляра, $м$.

Тот же вектор Умова можно представить как произведение локальной концен-

трации с удаляемого вещества в объеме капилляра на скорость u распространения концентрационного фронта, $м/с$:

$$I_m = cu. \quad (2)$$

Поскольку поток массы переносится с поверхности к центру капилляра вдоль его радиуса r , скорость можно представить как

$$u = r\gamma. \quad (3)$$

Приравняв (1) и (2), с учетом (3) получим

$$D \frac{\partial c}{\partial r} = cr\gamma. \quad (4)$$

Решением дифференциального уравнения (4) при граничном условии, что на поверхности капилляра $r = R$, концентрация c_0 удаляемого вещества равна

$$r = R, \quad c = c_0,$$

является функция

$$\frac{c}{c_0} = \exp\left[-\frac{\gamma}{2D}(R^2 - r^2)\right]. \quad (5)$$

Ограничимся линейным приближением при разложении экспоненты (5). Тогда

$$\frac{c}{c_0} = 1 - \frac{\gamma}{2D}(R^2 - r^2). \quad (6)$$

Из (6) следует, что концентрационный профиль по сечению капилляра принимает вид параболы. На поверхности капилляра концентрация удаляемых веществ максимальна.

Доставка удаляемых веществ с поверхности в объем капилляра может также осуществляться вместе с переносом импульса. Вектор плотности I_{mv} потока импульса для стационарного течения можно записать так:

$$I_{mv} = \frac{d(mv)}{dt ds} = \frac{m}{ds} \frac{dv}{dt} + \frac{vcdV}{dt ds} = vI_m. \quad (7)$$

Здесь $t(c)$ – время; m (кг) – масса удаляемых веществ; v (м/с) – скорость; V (м³) – выделенный объем капилляра; s (м²) – боковая поверхность выделенного участка капилляра; I_m (кг/м² с) – удельный поток массы.

Удельный поток импульса по аналогии с равенством (1) представим как

$$I_{mv} = -\eta \frac{\partial v}{\partial r}, \quad (8)$$

где η (кг·с/м²) – коэффициент вязкости.

С учетом (7), (2), и (3) равенство (8) имеет вид

$$-\eta \frac{\partial v}{\partial r} = \gamma c v. \quad (9)$$

Решением дифференциального уравнения (9) при граничном условии

$$r = 0, \quad v = v_0$$

является выражение

$$\frac{v}{v_0} = \exp\left(-\frac{\gamma c}{\eta} \frac{r^2}{2}\right). \quad (10)$$

Ограничимся линейным приближением при разложении экспоненты. Тогда

$$\frac{v}{v_0} = 1 - \frac{\gamma c}{2\eta} r^2. \quad (11)$$

Профиль скорости так же, как и концентрационный, подчиняется параболическому закону.

Для того, чтобы выяснить, какой механизм доставки частиц с поверхности капилляра оказывает существенное влияние на промывку, выразим из (6) и (11) коэффициент скорости массопереноса. Соответственно получим:

$$\gamma = \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) \left(\frac{2D}{R^2 - r^2}\right), \quad (12)$$

$$\gamma = \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \frac{2\eta}{cr^2}. \quad (13)$$

В целях оценки по порядку величины значения коэффициента скорости массопереноса γ , найденного из выражений (12) и (13), необходимо знать численные значения коэффициентов диффузии и вязкости, радиуса капилляра и др. Для значений температуры $T = 293^\circ\text{K}$ коэффициент диффузии по порядку величины примем равным $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент вязкости $\eta = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Труднее выбрать значение радиуса капилляра (размера поры текстильного материала).

Функция распределения пор по размерам зависит от вида текстильного материала и, как показывают эксперименты, от применяемого способа ее определения. По одним исследованиям функция распределения имеет один максимум. По другим – число максимумов достигает трех.

Чаще других в качестве наиболее вероятного значения размера пор для хлопчатобумажных тканей приводится число, равное в среднем 10^2 мкм . Можно ожидать (по аналогии с максвелловским распределением), что наиболее вероятное значение по порядку величины мало отличается от среднего значения. Исходя из этих соображений примем среднее значение радиуса пор равным $R = 50 \text{ мкм}$.

Среднее значение концентрации моющего раствора внутри капилляра примем равным $c = 50 \text{ кг/м}^3$. При этих условиях из (12) $\gamma = 0,53 \text{ 1/с}$, то есть по порядку величины $\gamma = 10^0 = 1 \text{ 1/с}$, а по выражению (13) $\gamma = 10^4 \text{ 1/с}$.

Обратим внимание, что величина γ , найденная по равенству (12), по порядку величины близка к экспериментальному значению [6]. Расчеты же по равенству (13) приводят к значению $\gamma = 10^4 \text{ 1/с}$, что на много порядков превышает экспериментальное значение γ .

Можно заключить следующее: при промывках решающая роль принадлежит диффузионным процессам. Это означает, что для интенсификации процесса следует стремиться увеличить значения коэффициента диффузии и соответственно коэффициента скорости процесса γ .

Из теории броуновского движения А. Эйнштейна следует, что в неограниченном объеме коэффициент диффузии равен

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r_*}, \quad (14)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; r_* – радиус диффундирующей частицы.

Из (14) видно, что для увеличения коэффициента диффузии необходимо повышать температуру и уменьшать коэффициент вязкости среды, в которой протекают процессы. Отсюда следуют и возможные способы интенсификации промывки текстильных материалов. Прежде всего, и это отмечается в литературе, необходимо повышать температуру, при которой ведется процесс. Повышение температуры способствует не только ускорению процесса переноса по раствору, но и ускоряет образование зародышей частиц, впоследствии удаляемых с поверхности. С повышением температуры уменьшается и коэффициент вязкости водных растворов, что приводит к росту коэффициента скорости массопереноса. Впрочем, как следует из [6], нет необходимости доводить промывной раствор до кипения.

Увеличить γ , и тем самым скорость промывки, можно в соответствии с равенством (14) путем введения в промывной раствор химических веществ, понижающих вязкость, или воздействовать на раствор физическими полями.

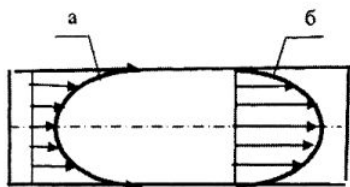


Рис. 1

В [7], [8] обращается внимание на влияние на процесс промывки скорости движения раствора относительно текстильного материала. Из рассмотренного выше диффузионного механизма промывки влияние скорости не просматривается. Более того, если представить графически (рис. 1) изменение концентрации удаляемого вещества по диаметру капилляра (концентрационный профиль) – кривая а, соответствующая уравнению (6), и профиль скорости ламинарного течения в капилляре (из-за малости диаметра капилляра течение ламинарное) – кривая (б), то нетрудно обнаружить, что у стенки капилляра скорость минимальна, а концентрация максимальна. Такой характер кривых (а) и (б) затрудняет удаление вещества с поверхности в зону капилляра с максимальной скоростью и таким образом замедляет процесс промывки.

Скорее всего влияние скорости на процесс промывки проявляется в первом периоде, когда, как предположено в [7], идет процесс механического замещения загрязнений на поверхности ткани и в межнитевом пространстве более чистым промывным раствором.

Об изложенном выше свидетельствуют и результаты экспериментов [9] по сравнению промывки тканей при фильтрации и продольном обтекании. При одних и тех же начальных и температурных условиях время промывки тканей до определенного значения конечной степени промывки оказалось одним и тем же, как при фильтрации, так и при продольном обтекании, хотя время первого периода промывки при фильтрации оказалось в два-три раза меньше.

Остаточное содержание удаляемых веществ в текстильном материале определяется количеством пор малого размера. Ни фильтрацией, ни другими умеренными механическими воздействиями ускорить диффузию в таких порах не удастся. И применение всевозможных турбулизаторов, сопел, низкочастотных генераторов оказываются малоэффективными.

Конструировать промывные машины необходимо с учетом того, что всевозможными механическими и им подобными внешними воздействиями можно сократить первый период промывки, а во втором периоде следует, если применять, то высокоэнергетические воздействия, добавлять в раствор химически активные вещества, либо увеличивать заправочную длину, учитывая малую скорость диффузионных процессов.

ВЫВОДЫ

1. Аналитически показано, что в порах текстильного материала при промывках перенос массы удаляемого вещества с поверхности осуществляется диффузионным путем.

2. Механические воздействия на текстильный материал (применение всевозможных турбулизаторов, сопел, фильтрации, низкочастотных генераторов и пр.) малоэффективны при промывках. Они влияют на первый период промывки, но не способны ускорить диффузионные процес-

сы в капиллярах из-за малости их поперечных размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидзон М.И., Маурин Л. Н. // Инженерно-физический журнал. – 1986, № 3, т.50.
2. Давидзон М.И., Маурин Л. Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1989, № 6.
3. Давидзон М.И. Массоперенос в капиллярах с поглощающими стенками. – Иваново. ИвГУ, 1992.
4. Давидзон М.И., Маурин Л. Н. // Теплоэнергетика. – 2000, № 9. С. 55...57.
5. Давидзон М.И. // Теплоэнергетика. – 2001, №1. С. 72...73.
6. Давидзон М.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, № 3.
7. Смирнов В.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984, № 6.
8. Смирнов В. И. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1979, №4.
9. Процессы промывки тканей и методы их интенсификации / Под ред. Б.С. Сажина, Ф.Л. Альтер-Песоцкого. – М., 1984.

Рекомендована кафедрой общей физики и методики преподавания. Поступила 03.12.03.